第 37 卷第 14 期 2017 年 7 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.14 Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604110661
肇思迪,娄运生,张祎玮,朱怀卫,石一凡.UV-B 增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其增温潜势的影响.生态学报,2017,37(14):4715-4724.
Zhao S D, Lou Y S, Zhang Y W, Zhu H W, Shi Y F.Effect of silicate supply on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in a Chinese paddy soil under enhanced UV-B radiation.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4715-4724.

UV-B 增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其增温潜势的影响

肇思迪,娄运生*,张祎玮,朱怀卫,石一凡
南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

摘要:大气平流层臭氧损耗导致的地表紫外辐射增强作为全球变化重要问题之一,受到广泛关注。硅是水稻生长有益元素,但施硅是否影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放,迄今相关报道尚不多见。通过大田试验,研究 UV-B 增强下施硅对水稻生长、稻田甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放及其增温潜势的影响。UV-B 辐照设 2 水平,即对照(A,自然光)和增强 20%(E);施硅量设 2 水平,即对照(Si0,0 kg SiO_2/hm^2)和施硅(Si1,200 kg SiO_2/hm^2)。结果表明,UV-B 增强降低了成熟期水稻地上部和地下部生物量,而施硅能缓解 UV-B 增强对水稻生长的抑制作用,使水稻地上部和地下部生物量增加。UV-B 增强可显著提高稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量和累积排放量,增加稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合增温潜势。施硅能明显降低稻田 CH_4 排放,促进 N_2O 排放,降低稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合增温潜势。研究表明,施硅显著降低稻田 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势,缓解 UV-B 增强对稻田 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势的促进作用。
关键词:UV-B 辐射;施硅;水稻;甲烷;氧化亚氮

Effect of silicate supply on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in a Chinese paddy soil under enhanced UV-B radiation

ZHAO Sidi, LOU Yunsheng*, ZHANG Yiwei, ZHU Huaiwei, SHI Yifan
Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China

Abstract: Enhanced ultraviolet-B (UV-B) radiation, one of the most important problems caused by global climate change, is induced by the depletion of the stratospheric ozone layer and has received considerable attention worldwide. It has resulted in damage to various plant processes, including growth inhibition, photosynthetic depression, lipid peroxidation, and ultra-structural change, and this has led to crop yield reductions. Methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) are two potent greenhouse gases, and have 21 and 310 times higher global warming potentials (GWP), respectively, than CO_2 on a 100-year time scale. N_2O is the most important ozone-depleting substance in the 21st century, and paddy fields are regarded as one of the most important biological sources of N_2O and CH_4. Silicate is beneficial to rice growth, but so far there have been few reports on whether silicate application can reduce CH_4 and N_2O emissions from paddy soils. A field experiment was conducted to investigate the effects of silicate application on CH_4 and N_2O emissions and their GWPs in a Chinese paddy soil under enhanced UV-B radiation. The experiment had two UV-B radiation levels, i.e. ambient UV-B (A, ambient) and enhanced UV-B radiation (E, enhanced by 20%); and two silicate application levels, i.e. a control (Si0, 0 kg SiO_2/hm^2) and added silicate (Si1, 200 kg SiO_2/hm^2). The experiment was undertaken at the Station of Agricultural Meteorology,

基金项目:国家自然科学基金(41375159);江苏省自然科学基金(BK20131430)
收稿日期:2016-04-11; **网络出版日期**:2017-03-02
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yunshlou@163.com

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China. The emission fluxes for CH_4 and N_2O were determined by the closed chamber method at one-week intervals during the rice growing period. The results showed that, compared to ambient UV-B radiation, enhanced UV-B radiation decreased the shoot, root, and whole rice plant dry matter weights at the maturity stage by 13.12%, 53.31%, and 25.85%, respectively, in the no silicate treatment; and by 1.47%, 34.49%, and 11.12%, respectively, in the added silicate treatments. Therefore, enhanced UV-B radiation clearly depressed rice growth, but supplying silicate could significantly alleviate the depressive effect of enhanced UV-B radiation on rice growth. Enhanced UV-B radiation significantly increased CH_4 flux and its accumulated emissions, whereas supplying silicate significantly reduced CH_4 flux and its accumulated emissions. In the treatments without adding silicate, enhanced UV-B radiation significantly increased CH_4 accumulated emissions at the tillering stage, jointing-booting stage, heading-flowering stage, grain filling-maturity stage, and over the whole growth period by 101.65%, 63.12%, 13.96%, 3.94%, and 89.43%, respectively, over that under the ambient UV-B radiation. Under enhanced UV-B radiation, adding silicate significantly decreased CH_4 accumulated emissions by 35.83%, 45.96%, 39.84%, 10.29%, and 38.41%, respectively. Enhanced UV-B radiation also significantly increased N_2O flux and its accumulated emission levels. In the treatments with no additional silicate, enhanced UV-B radiation significantly increased N_2O accumulated emission levels at the tillering stage, jointing-booting stage, heading-flowering stage, grain filling-maturity stage and over the whole growth period by 69.89%, 41.62%, 134.57%, 84.46%, and 73.69%, respectively, over those under the ambient UV-B radiation. The effects of silicate supply on N_2O emissions from the paddy soil changed depending on the rice growth stage. Under enhanced UV-B radiation, supplying silicate significantly reduced N_2O accumulated emissions at the tillering stage and heading-flowering stage by 16.57% and 32.97%, respectively, but increased N_2O accumulated emissions at the jointing-booting stage, grain filling-maturity stage, and over the whole growth period by 68.06%, 23.09%, and 29.53%, respectively. It also significantly increased the global warming potentials (GWPs) of CH_4 and N_2O by 51.92% to 83.31%, respectively. Supplying silicate significantly reduced the GWPs of CH_4 and N_2O by 1.19% to 18.10%, respectively. In conclusion, enhanced UV-B radiation significantly increased N_2O flux and its accumulated emissions, and stimulated the GWPs of CH_4 and N_2O. Silicate application significantly reduced CH_4 flux and its accumulated emissions, promoted N_2O flux and accumulated emissions, and reduced the GWPs of CH_4 and N_2O. This study suggests that silicate application can reduce CH_4 and N_2O emissions and subsequent GWPs, and reduce the contribution of enhanced UV-B radiation to global warming potentials.

Key Words: UV-B radiation; silicate supply; rice; methane; nitrous oxide

紫外辐射增强和全球变暖是当今两大重要的全球环境问题。近年来,由于氟氯烷烃和氮氧化物的大量排放,大气平流层臭氧不断损耗变薄,导致到达地表的 UV-B 辐射增强[1]。全球变暖源于温室气体的大量排放,而 CH_4 和 N_2O 是两种重要的温室气体。以百年尺度计,CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势(global warming potential,GWP)分别是 CO_2 的 21 倍和 310 倍[2]。据报道,2005 年全球的 CH_4 和 N_2O 农业排放总量比 1990 年增加了 17%[3]。因此,稻田作为 CH_4 和 N_2O 的重要排放源已受到国内外普遍关注[4-6]。

近年来,关于 UV-B 辐射增强对农田温室气体排放的研究主要集中在 CH_4 或 N_2O 单一温室气体,UV-B 增强可显著增加水稻 CH_4 排放[7],降低大豆和冬小麦的 N_2O 排放[8-9],但 UV-B 辐射增强对 CH_4 和 N_2O 综合排放及其增温潜势的影响研究较少。硅是水稻生长的有益营养元素,施硅可促进水稻植株地上部和根系生长,提高水稻对病虫害、重金属和 UV-B 辐射等生物和非生物胁迫的抵抗能力[10]。水稻生长状况对稻田 CH_4 和 N_2O 排放有一定影响。但是,迄今有关 UV-B 辐射增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放影响的研究尚不多见。本研究通过田间试验模拟 UV-B 辐射增强,研究 UV-B 辐射增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其增温潜势的影响,为进一步研发减缓稻田温室气体排放的新措施提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

田间试验于 2015 年 5 月至 11 月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N,118.86°E)进行。该站地处北亚热带湿润气候区,年均降水量 1000—1100 mm,年均气温 15.6℃。供试水稻为南粳 46。供试硅肥为硅酸钠。供试土壤为潴育型水稻土,土壤质地为壤质粘土。供试土壤基本理化性质为,全碳、全氮的含量分别为 19.4 g/kg 和 1.45 g/kg;粘粒含量为 261 g/kg;pH 为 6.2 (1∶1 土水比)。本试验设 UV-B 辐照和施硅量两个因素,UV-B 辐照设 2 水平,即对照(A,自然光)和增强 20%(E)。采用可升降灯架,UV-B 灯管(光谱为 280—320 nm)置于水稻冠层上方,用于模拟 UV-B 辐射增强。施硅量设 2 水平,即对照(Si0,0 kg SiO_2/hm^2)和施硅(Si1,200 kg SiO_2/hm^2)。试验共设 4 个处理,即(1) UV-B 增强+施硅(E+Si1),(2) UV-B 增强+不施硅(E+Si0),(3)自然光+施硅(A+Si1),(4)自然光+不施硅(A+Si0)。重复 3 次,随机排列,共 12 个小区,小区面积为 2 m×2 m=4 m^2。

水稻于 2015 年 5 月 10 日育苗,6 月 13 日移栽,株行距为 16 cm×23 cm。移栽前 1 天施肥,每小区施用复合肥料(15-15-15)315 g,相当于氮磷钾(N-P_2O_5-K_2O)施用量均为 200 kg/hm^2,施硅处理的每小区(Si1)施硅酸钠 183 g,相当于施硅量为 200 kg/hm^2。在每小区内挖 4 条施肥沟(深 20 cm),根据施肥处理要求将肥料均匀撒入施肥沟中,覆土掩埋。幼苗移栽前将静态采样箱底座置于土内,每底座内移入长势一致的幼苗 1 丛(2 株)。从水稻分蘖期(移栽 25 d 后)开始进行 UV-B 辐照处理,光源与水稻冠层之间距离始终保持约 0.8 m,每天辐照时间为 8:00—16:00,共计 8 h,阴雨天停止照射,直至水稻成熟。在 2015 年 8 月 15 日至 9 月 1 日进行排水晒田,大田常规管理,病虫害防治依据实际情况进行。水稻生长期水层厚度保持约 5 cm,根据水层变化及降雨情况进行合理灌溉。

1.2　气体采集与分析

采用静态箱法从田间采集 CH_4 和 N_2O 气样。自水稻分蘖期至成熟期,每周采样一次,采样时间为 8:00—11:00,同时记录箱内温度。采样时将 PVC 静态箱底部置于事先固定于土壤的底座上,盖箱后通过淹水层密封保证箱体气密性。抽气前接通采样箱顶内置小风扇电源 20 s,使采样箱内气体混合均匀,分别于 0、15、30 min 用带有三通阀的注射器抽取气样,将所采气样注入事先抽成真空的采样瓶(50 mL)中,用气相色谱仪检测气样中 CH_4 和 N_2O 的浓度。

CH_4 和 N_2O 排放通量计算公式[11]:

$$F = \rho \cdot H \cdot 60 \cdot \frac{273}{(273 + T)} \cdot \frac{dc}{dt}$$

式中,F 为气体排放通量(mg m^{-2} h^{-1});ρ 为标准状态下气体密度,CH_4 和 N_2O 气体密度分别为 0.714 kg/m^3 和 1.25 kg/m^3;H 为采样箱气室高度(m),箱高 0.7 m,8 月 20 日加箱,加箱后箱高 1.3 m;T 为采样时箱内平均温度(℃);$\frac{dc}{dt}$ 为箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

水稻各生育期 CH_4 和 N_2O 累积排放量计算公式:

$$T = \sum [(F_{i+1} + F_i)/2] \cdot (D_{i+1} - D_i) \cdot 24$$

式中,T 为气体累积排放总量(mg/m^2);F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 次和 i+1 次采样时气体平均排放通量(mg m^{-2} h^{-1});D_i 和 D_{i+1} 分别是第 i 次和 i+1 次采样时的采样时间(d)。

1.3　生物量测定

在水稻成熟期进行采样,每小区随机选取有代表性的 3 株植株,采集地上部,同时将根系从土壤中挖出(注意根的完整性)并用自来水洗净。置入 105℃烘箱内杀青 20 min,随后在 70℃下烘干至恒重。

1.4 全球增温潜势估算

全球增温潜势(global warming potential,GWP)是用来评价各种温室气体对气候变化影响相对能力的一个参数。以百年尺度计,CH_4和 N_2O 气体的 GWP 分别是 CO_2的 21 倍和 310 倍[2]。因此,稻田 CH_4和 N_2O 排放的全球增温潜势计算方法,是将全生育期的 CH_4和 N_2O 累积排放量分别乘以 21 和 310,即为 CH_4和 N_2O 累积排放量的 CO_2当量。稻田 CH_4和 N_2O 排放的综合增温潜势是将 CH_4和 N_2O 累积排放量的 CO_2当量相加得到。

1.5 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2010 软件进行处理与绘图,用 SPSS 21.0 统计分析软件进行统计分析。各处理平均数采用最小显著差数法(LSD 法)进行多重比较,得到处理间差异显著性。表中同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),相同字母表示处理间差异未达到显著水平。图中 * 表示达到 0.05 的显著水平,未标明的表示未达到 0.05 显著水平。

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射增强下施硅对水稻单株生物量的影响

表 1 表明,无论施硅与否,UV-B 辐射增强降低了水稻地上部与地下部干物质积累。施硅条件下,UV-B 辐射增强使地上部和地下部干重分别减少了 1.47% 和 34.49%,总干物量减少了 11.12%。不施硅条件下,UV-B 辐射增强使地上部和地下部干重分别减少了 13.12% 和 53.31%,总干物量减少了 25.85%。无论施硅与否,UV-B 辐射增强下水稻地下部干重降幅均大于自然光条件下水稻地下部干重降幅,说明 UV-B 辐射增强对水稻根系影响更强烈。UV-B 增强条件下,施硅处理水稻地上部和地下部干重比不施硅处理分别增加 61.30% 和 43.74%,总干物量增加了 55.74%。自然光条件下,施硅处理水稻地上部和地下部干重比不施硅处理分别增加 44.69% 和 26.11%,总干物量增加了 37.52%。可见,UV-B 辐射增强明显降低水稻地上部与地下部干物质积累,而施硅明显促进水稻地上部与地下部干物质积累,有利于缓解 UV-B 辐射增强对水稻干物质积累的不利影响。

表 1 UV-B 增强下施硅对水稻地上部和地下部干物质量的影响

Table 1 Effects of silicate supply on shoot and root dry matter of rice under enhanced UV-B radiation (mean±SE)

处理 Treatment	地上部干重 Shoot dry weight/g	地下部干重 Root dry weight/g	全株干重 Whole plant dry weight/g
E+Si1	16.19±1.07a	6.69±2.03b	22.88±2.79b
E+Si0	10.04±2.43b	4.65±0.55c	14.69±3.96d
A+Si1	16.42±2.81a	8.99±3.07a	25.41±3.39a
A+Si0	11.35±1.24b	7.13±2.68b	18.48±2.96c

A: 自然光 Ambient UV-B; E:UV-B 增强 Enhanced UV-B; Si0: 对照 Control; Si1: 施硅 Silicate supply; 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 UV-B 辐射增强下施硅对 CH_4排放通量的影响

由图 1 看出,不同处理下水稻 CH_4排放的季节性变化趋势基本一致,均呈单峰型变化。在分蘖前期,CH_4排放通量较低,随后逐渐升高,在移栽后第 55 天(分蘖期)达到峰值,之后急剧降低,到移栽 76d(拔节孕穗期)后维持较低水平直到水稻成熟。在分蘖前期,稻田土壤虽已淹水但可能因闭蓄氧存在,土壤尚未形成厌氧环境,水稻苗期植株生物量较低,CH_4排放也较低。随淹水时间的延长,极端厌氧环境形成,水稻分蘖加快,根系分泌物增加,促进了产甲烷菌活动,CH_4排放随之升高,在移栽后第 55 天达到峰值。在移栽后第 58 天开始晒田,水层落干改善了土壤供氧状况,CH_4排放通量急剧下降,这与甲烷产生需要极端厌氧条件相一致[12]。自水稻移栽后 76d 至成熟,CH_4排放通量一直处于较低水平,原因可能在于,一是晒田改善了土壤通气性,提高了土壤氧化还原电位,覆水后闭蓄氧的存在抑制了 CH_4的产生;二是供试稻田质地粘重,粘粒的物理保护减少了有机质分解,粘质土壤中气体扩散作用较弱不利于甲烷扩散,此外,粘质土壤的缓冲性强,有助于维持较高

的氧化还原电位[13]。

在整个生育期内,无论施硅与否,UV-B 增强均使稻田 CH_4 排放通量增加。水稻在移栽后的第 27 天至 55 天(分蘖期),施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 CH_4 排放通量高于对照 467.41%、510.31%、183.95%、30.77% 和 36.55%。不施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 CH_4 排放通量高于对照 279.86%、212.67%、200.33%、72.08% 和 64.41%。无论 UV-B 辐射增强与否,施硅均显著降低稻田 CH_4 排放通量。在分蘖期,施硅处理的水稻 CH_4 排放通量均低于对照。自然光条件下,施硅处理水稻 CH_4 排放通量低于对照 75.33%、65.88%、39.82%、9.91% 和 14.47%。UV-B 辐射增强条件下,施硅处理水稻 CH_4 排放通量低于对照 63.15%、33.41%、43.09%、31.53% 和 28.96%。上述结果说明,UV-B 增强明显增加稻田 CH_4 排放,而施硅能明显减轻 UV-B 增强对稻田 CH_4 排放的促进作用。

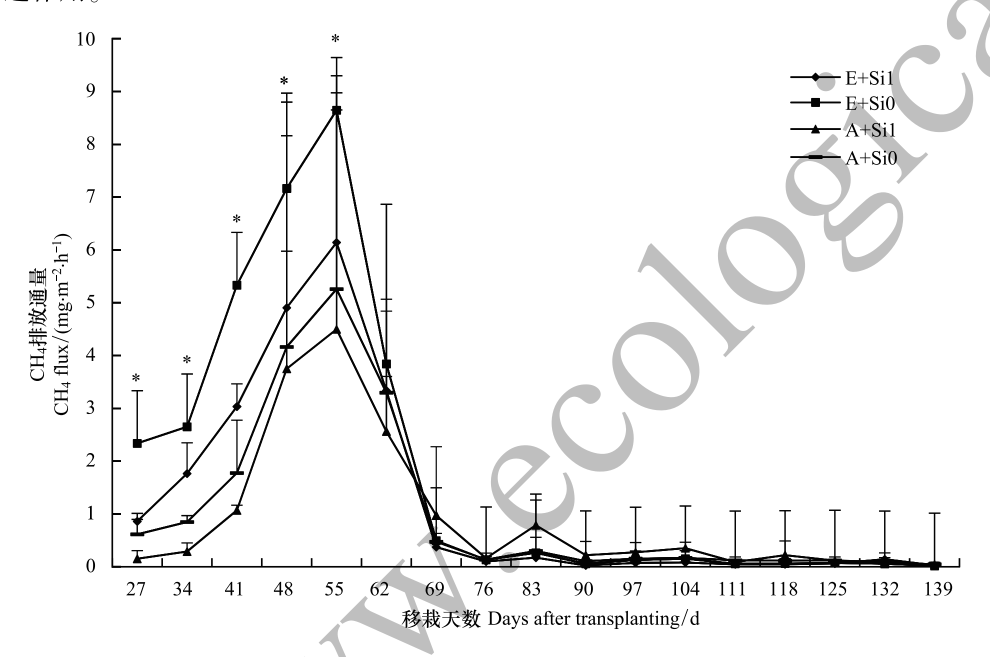


图 1　UV-B 增强下施硅对稻田 CH_4 排放通量季节性变化的影响

Fig.1　Effect of silicate supply on seasonal variation of CH_4 emission flux from paddy soil under enhanced UV-B radiation

A: 自然光 Ambient UV-B; E:UV-B 增强 Enhanced UV-B; Si0: 对照 Control; Si1: 施硅 Silicate supply; * 表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.3　UV-B 辐射增强下施硅对 CH_4 累积排放量的影响

表 2 表明,在水稻 4 个生育期中,分蘖期 CH_4 累积排放量最高,占总排放量的 80% 左右,拔节孕穗期次之,占总排放量的 18% 左右,抽穗扬花期和灌浆成熟期最少,仅各占总排放量的 1% 左右。施硅条件下,UV-B 增强使稻田 CH_4 累积排放量在分蘖期、拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆成熟期分别增加了 44.86%、18.71%、10.11% 和 4.23%,全生育期 CH_4 累积排放量增加了 38.62%。不施硅条件下,UV-B 增强使水稻 CH_4 累积排放量在上述 4 个生育期分别增加了 101.65%、63.12%、13.96% 和 3.94%,全生育期的 CH_4 累积排放量提高了 89.43%。无论 UV-B 增强与否,施硅能明显降低稻田 CH_4 累积排放量。自然光条件下,施硅处理的稻田 CH_4 累积排放累积量在上述 4 个生育期分别低于对照 10.68%、25.74%、37.74% 和 10.54%,在全生育期低于对照 48.32%。UV-B 辐射增强下,施硅处理的稻田 CH_4 累积排放量在上述 4 个生育期分别低于对照 35.83%、45.96%、39.84% 和 10.29%,在全生育期低于对照 38.41%。可见,UV-B 增强可显著促进稻田 CH_4 排放,在分蘖期和拔节孕穗期处理间差异均达显著水平($P<0.05$),而施硅能显著降低稻田 CH_4 排放,除灌浆成熟期外各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。上述结果说明,在整个生育期内,在 UV-B 增强条件下施硅对稻田 CH_4 排放有明显的抑制作用。

2.4　UV-B 辐射增强下施硅对 N_2O 排放通量的影响

由图 2 看出,不同处理下稻田 N_2O 排放的季节性变化趋势基本一致,均呈现多峰变化。在水稻分蘖期 N_2O 排放通量较低,呈无规则变化,移栽后第 55 天(分蘖期)开始逐渐升高,第 69 天(拔节孕穗期)达第 1 个峰值,随后降低,在移栽后第 90 天(拔节孕穗期)降至最低,之后在第 97 天(抽穗扬花期)达到第 2 个峰值,随后急剧降低,在移栽后第 132 天至 139 天(灌浆成熟期) N_2O 排放通量再次升高。在移栽后第 58 天开始晒田,水层落干改善了土壤通气性,促进了 N_2O 的产生, N_2O 排放出现峰值。移栽后第 73 天晒田结束并灌溉覆水, N_2O 排放逐渐降低至最低值,在第 97 天(抽穗扬花期)出现第 2 个峰值,原因在于此时处于阴雨季节,气温下降适于硝化及反硝化微生物活动有助于 N_2O 产生排放。在生育后期, N_2O 排放通量开始升高,原因在于临近收割时停止灌水,土壤表面干涸,破坏了淹水厌氧环境,从而导致了 N_2O 排放通量再次升高[14]。

表 2 UV-B 增强下施硅对水稻不同生育期 CH_4 累积排放量的影响

Table 2 Effects of silicate supply on CH_4 accumulated emission from paddy soil at different rice growth stages under enhanced UV-B radiation (mean±SE)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节孕穗期 Jointing-booting stage		抽穗扬花期 Heading-flowering stage		灌浆成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Whole growth period
	排放量 Emission/(mg/m²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m²)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m²)
E+Si1	2255.98±23.61b	81.53	424.31±9.33c	15.33	38.54±7.95b	1.39	48.16±4.72a	1.74	2767.01±23.04b
E+Si0	3516.04±37.52a	79.57	785.24±7.19a	17.77	64.08±8.57a	1.45	53.68±1.67a	1.21	4419.06±37.40a
A+Si1	1557.35±25.34d	78.02	357.46±11.61d	17.91	35.01±4.40b	1.75	46.20±2.99a	2.32	1996.03±26.46d
A+Si0	1743.58±33.02c	74.74	481.36±17.22b	20.63	56.23±8.05a	2.41	51.65±13.75a	2.21	2332.83±51.20c

在整个生育期内,UV-B 增强下水稻 N_2O 排放通量增加。在移栽后第 62 天至 83 天(拔节孕穗期),施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 30.89%、53.35%、109.04%和 137.48%;不施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 83.01%、0.91%、171.51%和 89.03%。在水稻移栽后第 97 天(抽穗扬花期),施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 102.92%;不施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 151.31%。在水稻移栽后第 132 天至 139 天(灌浆成熟期),施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 165.79%、22.98%;不施硅条件下,UV-B 增强处理的水稻 N_2O 排放通量高于对照 143.63%、93.99%。

施硅对稻田 N_2O 排放通量的影响在各个生育期有所不同。在移栽后第 62 天至 83 天(拔节孕穗期),施硅使稻田 N_2O 排放通量增加。自然光条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量高于对照 159.41%、11.15%、100.83%和 59.17%;UV-B 增强条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量高于对照 85.55%、68.92%、54.62%和 99.97%。在移栽后第 97 天(抽穗扬花期),施硅使稻田 N_2O 排放通量降低。自然光条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量低于对照 19.45%;UV-B 增强条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量低于对照 35.01%。在水稻移栽后第 132 天至 139 天(灌浆成熟期),施硅使稻田 N_2O 排放通量增加。自然光条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量高于对照 30.78%、126.81%;UV-B 增强条件下,施硅处理的稻田 N_2O 排放通量高于对照 42.68%、43.79%。上述结果说明,UV-B 增强提高稻田 N_2O 排放,而施硅在水稻拔节孕穗期和灌浆成熟期促进稻田 N_2O 排放,在抽穗扬花期则降低稻田 N_2O 排放。

2.5 UV-B 辐射增强下施硅对 N_2O 累积排放量的影响

从表 3 来看,4 个生育期中,拔节孕穗期 N_2O 累积排放量最高,占总排放量的 50%左右,抽穗扬花期次之,占总排放量的 24%左右,分蘖期占总排放量的 15%左右,灌浆成熟期最少,仅占总排放量的 11%左右。N_2O 累积排放量主要集中在拔节孕穗期,可能原因是这一时期进行了晒田,土壤通气性改善,促进了稻田 N_2O 产生和排放[14]。

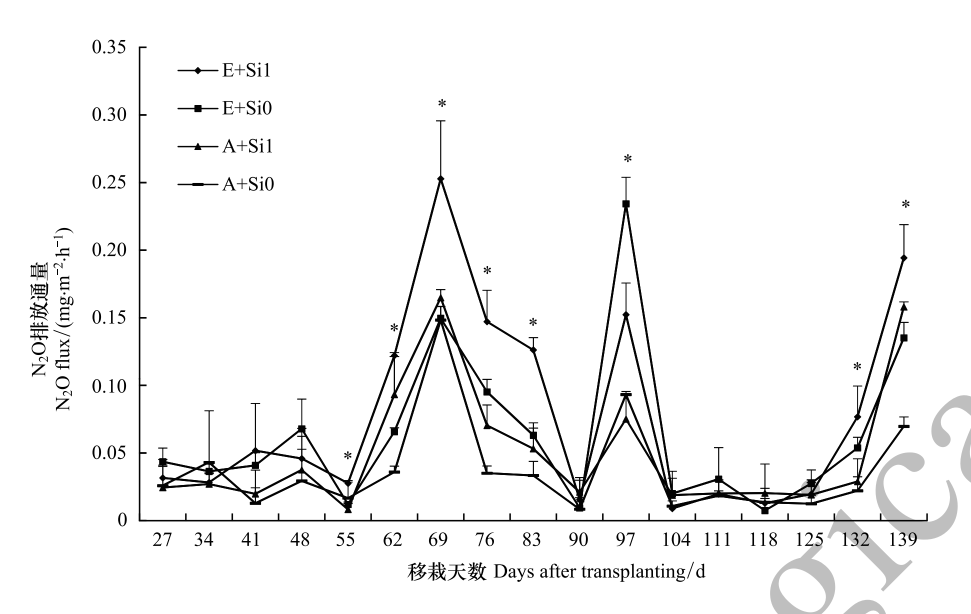


图 2　UV-B 增强下施硅对稻田N_2O排放通量季节性变化的影响

Fig.2　Effect of silicate supply on seasonal variation of N_2O emission flux from paddy soil under enhanced UV-B radiation

在整个生育期内,无论施硅与否,UV-B 增强显著提高了稻田N_2O的累积排放量。施硅条件下,与对照(自然光)相比,UV-B 增强使水稻N_2O累积排放量在不同生育期分别增加了 44.86%、58.91%、44.09%和 60.08%,全生育期N_2O累积排放量增加了 54.07%。不施硅条件下,与对照(自然光)相比,UV-B 增强使水稻N_2O累积排放量在不同生育期分别增加了 69.89%、41.62%、134.57%和 84.46%,全生育期的N_2O累积排放量提高了 73.69%。可见,UV-B 增强促进了稻田N_2O排放。施硅对不同生育期稻田N_2O累积排放量的影响存在差异。在自然光条件下,施硅处理的稻田N_2O累积排放量在分蘖期低于对照 2.15%,在拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆成熟期分别高于对照 49.78%、9.11%、41.84%,在全生育期内高于对照 14.90%。UV-B 增强下,施硅处理的稻田N_2O累积排放量在分蘖期和抽穗扬花期分别低于对照 16.57%、32.97%,在拔节孕穗期和灌浆成熟期分别高于对照 68.06%、23.09%,在全生育期内高于对照 29.53%。在各生育期内,施硅对稻田N_2O影响是不同的,但在整个生育期内,施硅可促进稻田N_2O排放。

表 3　UV-B 增强下施硅对水稻不同生育期N_2O累积排放量的影响

Table 3　Effects of silicate supply on N_2O accumulated emission from paddy soil at different rice growth stages under enhanced UV-B radiation (mean±SE)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节孕穗期 Jointing-booting stage		抽穗扬花期 Heading-flowering stage		灌浆成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Whole growth period
	排放量 Emission/(mg/m^2)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m^2)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m^2)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m^2)	占比 Percent/%	排放量 Emission/(mg/m^2)
E+Si1	26.45±3.60ab	13.16	112.77±12.75a	56.11	38.17±4.90b	18.99	23.60±4.58a	11.74	200.99±6.13a
E+Si0	31.70±2.63a	18.12	67.10±3.20b	38.36	56.95±5.52a	32.56	19.17±2.98ab	10.96	174.92±13.62b
A+Si1	18.26±3.58b	14.00	70.96±6.76b	54.40	26.49±4.25c	20.31	14.74±6.54bc	11.30	130.45±19.79c
A+Si0	18.66±9.46b	18.53	47.38±2.77c	47.04	24.28±0.24c	24.11	10.39±1.56c	10.32	100.71±9.19d

2.6　UV-B 辐射增强下施硅对水稻全生育期温室效应的影响

以百年时间尺度计算,CH_4和N_2O气体的全球增温潜势(GWPs)相当于 CO_2的 21 倍和 310 倍[2]。表 4 表明,UV-B 增强显著增加稻田全球增温潜势,无论施硅与否,UV-B 增强下全球增温潜势与对照相比增加

51.92%—83.31%。施硅可显著降低稻田全球增温潜势,无论 UV-B 增强与否,施硅与对照相比,GWPs 减少 1.19%—18.10%,处理间差异均达显著水平。可见,UV-B 增强显著提高 CH_4 和 N_2O 综合排放的全球增温趋势,而施硅显著降低 UV-B 增强对全球温室效应的贡献。

表 4 UV-B 增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势影响

Table 4 Effects of silicate supply on GWPs of CH_4 and N_2O from paddy soil under enhanced UV-B radiation (mean±SE)

处理 Treatment	CH_4		N_2O		总增温潜势 GWPs of CH_4 and N_2O / (kg/hm²)
	GWPs/ (kg/hm²)	占比 Percent/%	GWPs/ (kg/hm²)	占比 Percent/%	
E+Si1	581.07±4.83b	48.26	623.06±19.01a	51.74	1204.13±23.67b
E+Si0	928.01±7.85a	63.12	542.26±42.21b	36.88	1470.26±36.67a
A+Si1	419.17±5.56d	52.88	373.41±25.19c	47.12	792.57±30.06d
A+Si0	489.89±10.75c	61.07	312.19±28.47d	38.93	802.09±38.55c

GWPs: 全球增温潜势 Global warming potentials

3 讨论与结论

植株生物量反映外界环境因子对植株生长影响。本研究表明,UV-B 辐射增强导致水稻地上部和地下部生物量降低,抑制水稻生长发育(表 1)。原因在于 UV-B 辐射会损害光合系统Ⅱ,使其活性降低,抑制水稻光合作用,从而影响水稻生长发育。此外,UV-B 辐射会抑制水稻内源物质的合成,不利于地上部和根系生长发育[15]。施硅使水稻地上部和地下部生物量增加,促进水稻生长发育,减轻 UV-B 辐射增强的不利影响。一方面施硅有利于水稻形成“角质双硅层”,使水稻茎秆粗壮,叶片增厚,从形态上抵御 UV-B 辐射的伤害;另一方面施硅可调节水稻体内的酚类代谢,促进叶片酚类物质的合成以吸收 UV-B 辐射,进而增强其抵御 UV-B 辐射的能力[16]。因此,施硅可有效缓解 UV-B 辐射对水稻生长的抑制作用。

UV-B 辐射增强增加水稻 CH_4 排放通量及累积排放量,促进稻田 CH_4 排放(图 1,表 2),这与前人的研究结果一致[7,17]。也有研究表明,UV-B 辐射增强对稻田 CH_4 排放无显著影响[18],原因可能是稻田 CH_4 排放受土壤理化性质、水肥管理措施、耕作措施等因素影响[19-21],因此,试验条件的差异性可能带来不同的试验结果,需要进一步研究。施硅明显减弱 UV-B 辐射增强对稻田 CH_4 排放的促进作用,降低稻田 CH_4 排放通量及累积排放量,这与孟艳等人的研究结果一致[22]。施硅促进了水稻植株地上部和根系生长(表 1),改善通气组织和根系氧化能力,增加根际氧气供应量,抑制产甲烷菌活性,从而减少 CH_4 排放[23]。本试验所施硅肥为硅酸钠,施入酸性土壤短期内会使 pH 升高,而后趋于中性,大多数产甲烷菌活性以中性和偏碱性环境较佳[24-25],pH 升高可能促进产甲烷菌活性。因此,施硅引起的稻田土壤 pH 升高是否影响甲烷产生还需进一步研究。

UV-B 辐射增强显著提高稻田 N_2O 排放通量及累积排放量(图 2,表 3)。水稻 N_2O 排放主要来源于土壤硝化-反硝化微生物过程[26],UV-B 辐射增强显著增加了水稻根际土壤有效氮和土壤微生物碳、氮的量,提高碳氮比[27],为硝化-反硝化反应提供底物和能量,从而促进水稻 N_2O 排放。有研究表明,在拔节至抽穗期,UV-B 辐射增强对冬小麦 N_2O 排放通量没有显著影响[28]。UV-B 辐射增强显著降低了大豆的生物量,影响植株的氮代谢,最终导致农田 N_2O 排放量降低[9]。也有研究表明,UV-B 辐射增强 20% 对稻田 N_2O 排放通量无显著影响[18]。还有研究表明,不同种类作物对 UV-B 辐射的敏感性不同,且同类作物的不同品种对 UV-B 辐射的敏感性也不相同[29-31]。另外,水肥管理的差异对 N_2O 排放也有着重要的影响[32-33]。这些不同的研究结果可能是由于作物类型、土壤理化性质和水肥管理措施等因素不同造成的。从稻田 N_2O 排放季节性变化及不同生育期累积排放量来看,施硅促进了水稻 N_2O 排放,其原因可能在于,施硅促进了水稻通气组织刚性,提高了植株输氧能力和根系氧化力,施硅还可激活水稻根际过氧化物酶,引起土壤氧化还原电位(Eh)升高,促进了硝化作用[24]。稻田 N_2O 和 CH_4 排放存在一定的消长关系[34]。本研究也证明了这一点,施硅减少了稻田 CH_4 排放,却促进了 N_2O 排放。

UV-B 辐射增强显著提高水稻 CH_4 和 N_2O 排放通量和累积排放量,施硅可减少稻田 CH_4 排放,但可促进稻田 N_2O 排放。因此,可借用全球增温潜势(GWPs)来探究施硅是否能减轻稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应。结果表明,UV-B 增强显著增加了稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合增温潜势,而施硅则明显减轻了 UV-B 增强对全球增温潜势的贡献(表 4)。未来将继续进行相关研究,以进一步探究不同硅肥类型、施硅量、施硅方法对 UV-B 辐射下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应的影响。

参考文献(References):

[1] McKenzie R L, Aucamp P J, Bais A F, Björnd L O, Ilyas M. Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. Photochemical & Photobiological Sciences, 2007, 6(3): 218-231.

[2] Bhatia A, Pathak H, Jain N, Singh P K, Singh A K. Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains. Atmospheric Environment, 2005, 39(37): 6976-6984.

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 503-503.

[4] 唐海明, 肖小平, 孙继民, 汤文光, 汪柯, 李微艳, 杨光立. 种植不同冬季作物对稻田甲烷、氧化亚氮排放和土壤微生物的影响. 生态环境学报, 2014, 23(5): 736-742.

[5] 易琼, 逄玉万, 杨少海, 卢钰升, 付弘婷, 李苹, 蒋瑞萍, 唐拴虎. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.

[6] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. Chemosphere, 2005, 59(11): 1547-1556.

[7] 徐渭渭, 何永美, 湛方栋, 祖艳群, 李元. UV-B 辐射增强对元阳哈尼梯田稻田 CH_4 排放规律的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1329-1336.

[8] 蒋静艳, 牛传坡, 胡正华, 杨玉峰, 黄耀. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N_2O 排放的影响机理研究. 环境科学, 2006, 27(9): 1712-1716.

[9] 胡正华, 蒋静艳, 牛传坡, 陈书涛, 刘巧辉. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-大豆系统 N_2O 排放的影响. 生态学报, 2009, 29(12): 6754-6763.

[10] Tamai K, Ma J F. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 21-27.

[11] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001: 47-48.

[12] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 谢宁宁. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.

[13] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 鹤田治雄, 八木一行, 阳捷行. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响. 土壤学报, 1998, 35(2): 145-154.

[14] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, Zhang X, Lin S, Tao H B, Sattelmacher B. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3): 293-304.

[15] 刘兵, 王程, 金剑, 刘居东, 张秋英, 刘晓冰. UV-B 辐射增强对大豆等植物生理生态特性的影响. 大豆科学, 2009, 28(6): 1097-1102.

[16] 吴杏春, 陈裕坤, 李奇松, 方长旬, 熊君, 林文雄. 硅营养对 UV-B 辐射条件下水稻酚类代谢的影响. 中国农学通报, 2009, 25(24): 225-230.

[17] Lou Y S, Zhou W L, Ren L X. Elevated UV-B radiation increased CH_4 emission in transgenic rice from a paddy soil, Agriculture, Ecosystem & Environment, 2012, 151: 16-20.

[18] 胡正华, 凌慧, 陈书涛, 李琪, 蒋静艳, 牛传坡. UV-B 增强对稻田呼吸速率、CH_4 和 N_2O 排放的影响. 环境科学, 2011, 32(10): 3018-3022.

[19] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放及温室效应的影响. 水科学进展, 2010, 21(2): 235-240.

[20] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 万运帆, 高清竹, 彭华, 秦晓波. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究. 大气科学, 2011, 35(4): 707-720.

[21] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 廖育林, 范美蓉, 高清竹, 刘硕, 马欣. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 农业工程学报, 2014, 30(11): 216-224.

[22] 孟艳, 娄运生, 吴蕾, 崔合洋, 王卫清. UV-B 增强下施硅对水稻生长及 CH_4 排放的影响. 应用生态学报, 2015, 26(1): 25-31.

[23] 王远敏. 硅对水稻生长发育及产量品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.

[24] 杨丹, 刘鸣达, 姜峰, 张玉龙. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 I. 对土壤 pH、Eh 及硅动态的影响. 农业环境科学学报, 2012,

31(4): 757-763.

[25] 郭彬, 娄运生, 梁永超, 张杰, 华海霞, 奚云龙. 氮硅肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响. 生态学杂志, 2004, 23(6): 33-36.

[26] Zou J W, Huang Y, Sun W J, Zheng X H. Contribution of plants to N_2O emissions in soil-winter wheat ecosystem: pot and field experiments. Plant and soil, 2005, 269(1/2): 205-211.

[27] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响. 生态环境, 2007, 16(3): 1044-1052.

[28] 杨燕萍, 胡正华, 李涵茂, 陈书涛, 季雨虹, 李岑子. UV-B 辐射增强对冬小麦生态系统呼吸速率和N_2O排放日变化的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1733-1741.

[29] 吴杏春, 林文雄, 黄忠良. UV-B 辐射增强对两种不同抗性水稻叶片光合生理及超显微结构的影响. 生态学报, 2007, 27(2): 554-564.

[30] 蒋翔, 祖艳群, 蒋超, 韦莉梅, 李元. 不同番茄品种生长和生理特征对增强 UV-B 辐射响应的差异. 云南农业大学学报, 2015, 30(4): 599-606.

[31] 娄运生, 黄岩, 李永秀, 张晶, 曹畅, 朱婷婷, 蒋铭皓, 康汉锦. UV-B 辐射增强对不同大麦品种生理特性的影响. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 51-55.

[32] 罗良国, 近藤始彦, 伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田N_2O和 CH_4排放特征及其环境影响. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3200-3206.

[33] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294-298.

[34] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 杨俊诚, 邓仕槐, 李先, 郭俊娒, 李玲玲, 刘晓, 周贵宇. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 578-584.